

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-082311

(43)Date of publication of application : 22.03.2002

(51)Int.Cl. G02B 27/28  
H04B 10/02  
H04B 10/18

(21)Application number : 2001-195908

(71)Applicant : ALCATEL

(22)Date of filing : 28.06.2001

(72)Inventor : PENNINCKX DENIS  
LANNE STEPHANIE

(30)Priority

Priority number : 2000 00401942 Priority date : 06.07.2000 Priority country : EP

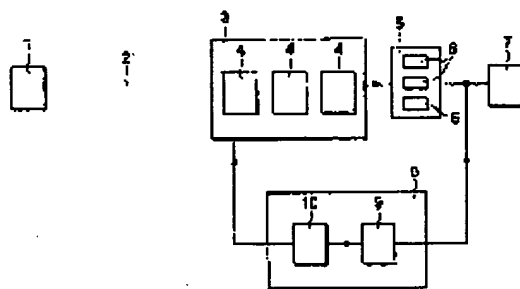
## (54) COMPENSATION OF POLARIZATION MODE DISPERSION

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a method and an apparatus for compensating polarization mode dispersion (PMD).

SOLUTION: The method and apparatus are provided with a polarization controller 3, connected to a differential group delay(DGD) generator 5b to compensate the PMD of a transmitted optical signal. The controller 3 is controlled by a feedback loop, which executes optimization algorithm for optimizing the feedback parameter of an output signal from the DGD generator 5. The optimization algorithm takes into consideration the state of polarization(SOP) of an optical signal which is determined from an output signal of the controller or the DGD generator.

Fig. 1



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision  
of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's  
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号  
特開2002-82311  
(P2002-82311A)

(43) 公開日 平成14年3月22日 (2002.3.22)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	ノート*(参考)
G 0 2 B 27/28		G 0 2 B 27/28	Z 2 H 0 9 9
H 0 4 B 10/02		H 0 4 B 9/00	M 5 K 0 0 2
10/18			

審査請求 未請求 請求項の数 9 O L 外国語出願 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2001-195908(P2001-195908)	(71) 出願人	391030332 アルカテル フランス国、75008 パリ、リュ・ラ・ボ エテイ 54
(22) 出願日	平成13年6月28日(2001.6.28)	(72) 発明者	ドユニ・ベナンクス フランス国、91620・ノザイ、リュ・バス トゥール、5
(31) 優先権主張番号	0 0 4 0 1 9 4 2 . 8	(72) 発明者	ステファニー・ラヌ フランス国、75014・パリ、リュ・デ・ブ ラント、41
(32) 優先日	平成12年7月6日(2000.7.6)	(74) 代理人	100062007 弁理士 川口 義雄 (外1名)
(33) 優先権主張国	欧州特許庁 (E P)	Fターム(参考)	2H099 AA01 BA00 CA05 CA13 5K002 BA02 CA01 CA12 CA16

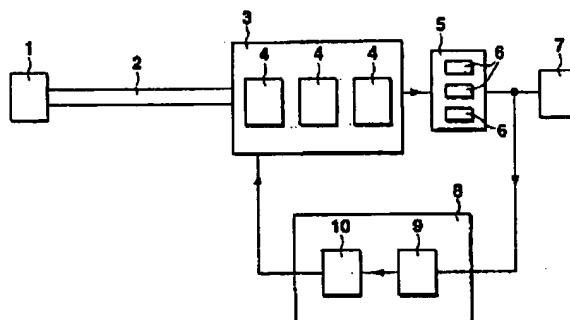
(54) 【発明の名称】 偏光モード分散の補償

(57) 【要約】

【課題】 偏光モード分散を補償するための方法および装置を提供すること。

【解決手段】 差分群遅延 (DGD) 発生器5に結合された偏光コントローラ3の手段を備えた、伝送光信号の偏光モード分散 (PMD) を補償するための方法および装置である。偏光コントローラ3はフィードバックループによって制御され、前記フィードバックループは最適化アルゴリズムを実行し、DGD発生器5の出力信号のフィードバックパラメータを最適化する。最適化アルゴリズムは、偏光コントローラ3の出力信号またはDGD発生器5の出力信号から決定される光信号の偏光状態 (SOP) を考慮している。

Fig. 1



**【特許請求の範囲】**

【請求項 1】 差分群遅延 (DGD) 発生器 (5) に結合された偏光コントローラ (3) を用いて、伝送光信号の偏光モード分散 (PMD) を補償するための方法であって、偏光コントローラ (3) はフィードバックループによって制御され、前記フィードバックループが最適化アルゴリズムを実行して、DGD 発生器 (5) の出力信号のフィードバックパラメータを最適化し、最適化アルゴリズムは、偏光コントローラ (3) の出力信号または DGD 発生器 (5) の出力信号から決定される光信号の偏光状態 (SOP) を考慮することを特徴とする伝送光信号の偏光モード分散 (PMD) を補償するための方法。

【請求項 2】 フィードバックパラメータが偏光度 (DOP) であることを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】 SOP が、DGD 発生器 (5) の出力信号から測定されるストークスパラメータから計算されることを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 4】 偏光コントローラ (3) が、少なくとも 1 つの複屈折エレメント (4) を備え、各複屈折エレメント (4) に対して、角度  $\alpha$  が固定であり、回転角度  $\beta$  が可変であり、角度  $\alpha$  は、ポアンカレ球 (20) の赤道面 (24) 上の回転軸 (23) と座標系の x 軸 (22) との間の角度であり、回転角度  $\beta$  は、回転軸 (23) の周囲の回転を定義することを特徴とする請求項 1 から 3 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 5】 ポアンカレ球 (20) 上の SOP の位置にある各複屈折エレメント (4) の効果が決定されていることを特徴とする請求項 1 から 4 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 6】 差分群遅延 (DGD) 発生器 (5) に結合された偏光コントローラ (3) を備えた、伝送光信号の偏光モード分散 (PMD) を補償するための装置であって、偏光コントローラ (3) はフィードバックループによって制御され、前記フィードバックループは最適化アルゴリズムを実行して、DGD 発生器 (5) の出力信号のフィードバックパラメータを最適化し、フィードバックループ (8) が、偏光コントローラ (3) の出力信号または DGD 発生器 (5) の出力信号から決定される偏光状態 (SOP) を測定するための手段 (9) と、最適化アルゴリズムを実行する計算ユニット (10) とを備え、そのステップが SOP によって決まることを特徴とする伝送光信号の偏光モード分散 (PMD) を補償するための装置。

【請求項 7】 SOP が、DGD 発生器 (5) の出力信号から測定されるストークスパラメータから計算されることを特徴とする請求項 6 に記載の装置。

【請求項 8】 偏光コントローラ (3) が、少なくとも 1 つの複屈折エレメント (4) を備えることを特徴とす

【請求項 9】 DGD 発生器 (5) が、少なくとも 1 本の偏光保存ファイバ (PMF) (6) を備えることを特徴とする請求項 6 に記載の装置。

**【発明の詳細な説明】****【0001】**

【発明の属する技術分野】 本発明は、差分群遅延発生器に結合され、制御アルゴリズムによって計算されるフィードバック信号によって制御される偏光コントローラを用いて、伝送光信号の偏光モード分散 (PMD) を補償するための方法および装置に関する。

**【0002】**

【従来の技術】 当技術分野においては、このタイプの方法および装置は、EP-O 853395 によって知られている。

【0003】 ファイバリンクは、そのすべてのタイプにおいて、偏光モード分散なる現象を呈している。すなわち、放出器端末から放出され、ファイバリンクを介して伝送されるインパルスあるいは信号は、変形した状態で受信器端末に受信される。信号の継続期間は、放出時の継続期間より長くなる。この変形は、伝送中に光信号が偏光解除することによるものである。ファイバリンクの他端で受信される信号は、2 つの直角成分とみなすことができる。1 つは、最大伝搬速度を有する偏光状態 (SOP) に対応し、もう 1 つは、最小伝搬速度を有する SOP に対応している。つまり、ファイバリンクの他端で受信される信号は、先に到達する、優位偏光 SOP で偏光された第 1 の信号と、差分群遅延と呼ばれる、特にファイバリンクの長さによって決まる遅延時間だけ遅れて到達する、第 2 の遅延 SOP で伝搬する第 2 の信号から構成されているとみなすことができる。

【0004】 放出器端末が極めて短いインパルスの光信号を放出すると、互いに直角に偏光され、かつ、差分群遅延に相当する遅延時間を有する 2 つの連続するインパルスからなる光信号が受信器端末で受信される。この遅延時間は、数年前に製造された単モードファイバを備えた、長さ 100 km のリンクに対して、20 ps 程度である。受信器端末で受信されるインパルスの変形は、伝送データの復号誤りの原因となり、そのため、偏光モード分散は、アナログやデジタル光リンクの性能を制限する要因になっている。

【0005】 偏光保存ファイバとも呼ばれる、強偏光モード分散を有するファイバが知られている。このファイバは、ファイバの短い区画を用いることにより、固定の差分群遅延を付加することができる。偏光モード分散の光補償は、強偏光モード分散を有するファイバリンクによって生じる 2 つの直角偏光モードの間に、このような要素あるいは全差分群遅延発生器を配置することによって実現することができる。偏光モード分散の光補償は、ファイバリンクと同じ差分群遅延を有する偏光保存

理的SOPとを交換し、あるいは、ファイバリンクおよびPMFからなるシステムの原理的SOPを、放出源のSOPに一致させることによって実施することができる。このために、ファイバリンクとPMFとの間に偏光コントローラが設けられている。

【0006】差分群遅延の値およびリンクの原理的SOPは、温度および振動によって常に変化する。そのため補償手段は適応的でなければならず、また、少なくとも、補償するすべての差分遅延値に等しくなるように、PMFの差分群遅延を選択しなければならない。

【0007】光伝送システムにおけるこのようなPMD補償手段は、EP 0853 395 A1によって知られている。このPMD補償手段は、偏光コントローラおよび差分群遅延発生器を備えている。これらコントローラと発生器はファイバリンクと受信器端末との間に配置されている。フィードバックループは、DGD発生器によって分配される光信号の偏光度(DOP)を測定し、偏光コントローラに供給して、測定されたDOPを最適化する。しかし、DOPをフィードバック変数として使用すると、偏光コントローラの制御値を計算するためのアルゴリズムが複雑になる。また、偏光コントローラ内の複屈折エレメントの巻戻しも、大きな問題となる。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】したがって本発明の目的は、偏光コントローラを高速かつ高精度で制御するための方法および装置を提供することである。

【0009】

【課題を解決するための手段】本発明の第1の態様においては、上記問題は、差分群遅延(DGD)発生器に結合され、かつ、フィードバックループによって制御される偏光コントローラを用いて、伝送光信号の偏光モード分散(PMD)を補償するための方法および装置によって解決される。前記フィードバックループは最適化アルゴリズムを実行し、DGD発生器の出力信号のフィードバックパラメータを最適化する。上記アルゴリズムは、偏光コントローラの出力信号またはDGD発生器の出力信号から決定される光信号の偏光状態(SOP)を考慮する。フィードバックパラメータはDOPであり、電気スペクトル幅の測定値であり、あるいはアイの開きの測定値等である。測定手順が共通であるため、フィードバックパラメータはDOPであることが好ましい。フィードバックパラメータとしてDOPを使用する場合、DGD発生器の出力部でDOPを測定することがより実際の(同じ機器を使用することができるため)であるが、DOPをDGD発生器の入力部で測定する場合も、同じである。

【0010】本発明による方法の変更態様では、DGD発生器の出力信号から測定されるストークスパラメータ

合、非常に速い速度が要求される。ストークスパラメータは測定が容易であり、その測定値から、ポアンカレ球上におけるSOPの位置を容易に計算することができる。したがってストークスパラメータの測定は、偏光コントローラへの高速かつ正確なフィードバック用として最適である。アルゴリズムによって計算された制御信号は、偏光コントローラにフィードバックされる。ストークスパラメータを測定することにより、アルゴリズムを容易かつ高速にすることができる。したがって、単モードファイバリンクにおける高ビットレートの処理が可能になる。

【0011】本発明による方法の好ましい変形態様では、偏光コントローラは、少なくとも1つの複屈折エレメントを備えており、各複屈折エレメントに対して、角度 $\alpha$ は固定であり、回転角度 $\beta$ は可変である。角度 $\alpha$ は、ポアンカレ球の赤道面上の回転軸と座標系のx軸との間の角度であり、回転角度 $\beta$ は、回転軸の周囲の回転を定義している。複屈折エレメントは、ポアンカレ球上でSOPを回転させることによって、複屈折エレメントの入力部におけるSOPを、出力部における別のSOPに変化させる。

【0012】偏光コントローラは、可変角度 $\alpha$ または可変回転角度 $\beta$ のいずれか、あるいはその両方を備えた縦続複屈折エレメントからなっている。複屈折エレメントが可変回転角度 $\beta$ を持つ場合、複屈折エレメントは無限大の値に達することができず、また、他の複屈折エレメントは、当該複屈折エレメントを補償しなければならないため、最大回転角度 $\beta$ に達すると、複屈折エレメントを巻き戻さなければならない。巻戻しプロセスには複雑なアルゴリズムが必要である。対称的に、角度 $\alpha$ が可変であり、かつ、回転角度 $\beta$ が固定の場合、複屈折エレメントの複雑な巻戻しプロセスを容易にすることができ、あるいは回避することさえ可能である。

【0013】有利なことには、ポアンカレ球上のSOPの位置にある各複屈折エレメントの効果は決定している。ポアンカレ球上におけるSOPの位置または変化が分かれば、フィードバックループのアルゴリズムは、そのSOPの位置または変化を考慮することができ、それに応じてアルゴリズムのステップを変更することができる。SOPが回転軸に近い場合、アルゴリズムのステップが増加し、SOPが回転軸から離れている場合は、アルゴリズムのステップは少なくなる。また、偏光コントローラ内の各複屈折エレメントによるSOPの変化を知ることにより、SOPを変化させることなく、複屈折エレメントに印加される電圧、すなわち複屈折エレメントの位置を変更することができるように、複屈折エレメントを組み合わせたことができる。これにより巻戻しプロセスの速度を速くしている。SOPを決定し、それをフィードバックループのアルゴリズムに使用する方式は、

定で、角度 $\alpha$ が可変の偏光コントローラにも使用することができる。

【0014】本発明による装置の好ましい一実施形態では、偏光コントローラは、少なくとも1つの複屈折エレメントを備えている。DOPを最大化することによってPMDを補償するために、フィードバックループのアルゴリズムによって決定される制御信号を偏光コントローラにフィードバックし、偏光コントローラ内の複屈折エレメントの位置を調整している。本発明による装置を使用することにより、複屈折エレメントの不完全性を補償するために必要なアルゴリズムの複雑さが緩和されるため、複屈折エレメントに対する制約が緩和される。

【0015】DGD発生器は、少なくとも1本の偏光保存ファイバ(PMF)を備えていることが好ましい。偏光保存ファイバは、高速信号部分を偏光保存高複屈折ファイバの低速固有状態の中に送り出すことにより、あるいはその逆の方法によって、ファイバリンクによって生じる差分群遅延を補償している。

【0016】本発明のその他の利点については、以下の説明および図面から明らかになるであろう。また、本発明による上述の特徴および以下に示す特徴は、それぞれ個別に、あるいは任意に組み合わせた結合体として使用することができる。以下に示し、記述する実施形態は本発明を限定するものではなく、本発明を説明するための例示的特徴を有するものとして捉えられたい。

【0017】

【発明の実施の形態】図1において、数字1は、例えば、レーザによって供給される、完全に偏光された1つまたは複数の光搬送波の強度を変調することにより、光信号としてデータを伝送する放波器端末を表している。この光信号は、偏光コントローラ3に接続されたファイバリンク2に送り込まれる。偏光コントローラ3は、偏光状態(SOP)を制御するための複数の縦続複屈折エレメント4を備えている。偏光コントローラ3は、偏光コントローラ3が受信するすべての光信号成分の偏光角を回転させるために使用されている。差分群遅延(DGD)発生器5が、偏光コントローラ3の下流側に配置されている。DGD発生器5は、様々な長さの偏光保存ファイバ(PMF)6を備え、ファイバリンク2によって生じる遅延差を補償する。

【0018】DGD発生器5の光出力信号は、受信器端末7およびフィードバックループ8に伝送される。フィードバックループは、DGD発生器の出力信号のストークスパラメータを測定するための手段9と、手段9によって測定されたストークスパラメータを考慮して、偏光コントローラ3の制御信号を計算する計算ユニット10とを有している。

【0019】図2は、ポアンカレ球20における偏光状態(SOP)、例えばAを示す。ポアンカレ球20は、

態を表している。図2では、単位球(半径=1)が座標系と共に示されており、座標系の原点21はポアンカレ球20の中心にある。複屈折エレメント4は、ポアンカレ球20上でSOPを回転させることによって、複屈折エレメントの入力部におけるSOP(A、A'およびA'')を、出力部における別のSOP(B、B'およびB'')に変化させる。ポアンカレ球20における偏光のSOP(B、B'およびB'')の位置は、座標系のx軸22と回転軸23との間の角度 $\alpha$ 、および、ポアンカレ球20の赤道面24と線25との間の角度 $\beta$ によって定義される。線25は、入力部のSOP(B、B'およびB'')と回転軸23を結ぶ線であり、回転軸23に対して直角である。

【0020】図2において、角度 $\alpha$ は固定であり、角度 $\beta$ は可変である。この場合、入力部のSOP(A、A'およびA'')はすべて、ポアンカレ球20の赤道線上に位置しており、回転軸23までの距離がそれぞれ異なっている。複屈折エレメントが入力部のSOP(A、A'およびA'')を、回転軸23の周囲に角度 $\beta$ だけ回転させると、その結果としてSOP(B、B'およびB'')が得られる。入力部のSOP(A、A'およびA'')の回転軸までの距離が長い場合、出力部のSOP(B、B'およびB'')の距離も長くなる。したがってフィードバックループのアルゴリズムは、入力部のSOP(A、A'およびA'')の回転軸23からの距離に応じて、そのステップを適合させることができる。つまり、A、A'およびA''が回転軸に近いほどステップが増加し、A、A'およびA''が回転軸から遠いほどステップは少なくなる。

【0021】アルゴリズムの実施およびストークスパラメータの測定を実践的なものにするために、実施形態は偏光子およびフォトダイオードを使用している。具体化の例については、「Polarization measurement of signal and components: 信号とコンポーネントの偏光測定」(Agilent Technologies, Application Note 8509-1)を参照されたい。

【0022】回転軸は、角度 $\beta$ の僅かな変動により局所的に決定される。測定したSOPから回転マトリクスが得られる。回転軸の計算には、N. Walker等の「Polarization control for coherent communications: コヒーレント通信のための偏光制御」(IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 8, n3)に詳説されている理論が考慮されている。

【0023】PMD補償器の偏光コントローラが、セルと呼ばれる4つの複屈折エレメントから構成されている

準のアルゴリズムでは、セルの駆動電圧には、順次変動が加えられる。各セルに対するシーケンスは以下の通りである。

- ・固定量 $\Delta V$ だけ電圧を増加する。
- ・フィードバック信号（DOP等）を測定する。
- ・フィードバック信号が増加する場合、電圧をさらに $\Delta V$ だけ増加し、フィードバック信号が増加しない場合は、電圧を初期値に戻す。
- ・電圧を下げながら、上記手順を繰り返す。

【0024】本発明を考慮すると、アルゴリズムは、可変ステップ $\Delta V$ で電圧を変動させ、ポアンカレ球上に一定角度のステップをもたらすことができる。各セルに対して、回転軸が局部的に決定される。セルに印加する電圧は、SOPとセル回転軸との距離と、目標角度ステップによって決まる。主要な利点は、各セルの効果が定量的に把握されることである。すなわち、SOPがセルの回転軸上にある場合、そのセルは、偏光を制御することに関して何ら効果を有さないため、そのセルを作動させることは時間の浪費である。

【0025】「巻戻し」を実施する場合、各セルの効果を明確に知ることができれば、最善の回転組合せを見出すことが可能になり、それにより、合理的なセル電圧で初期SOPに戻ることができる。

#### 【図面の簡単な説明】

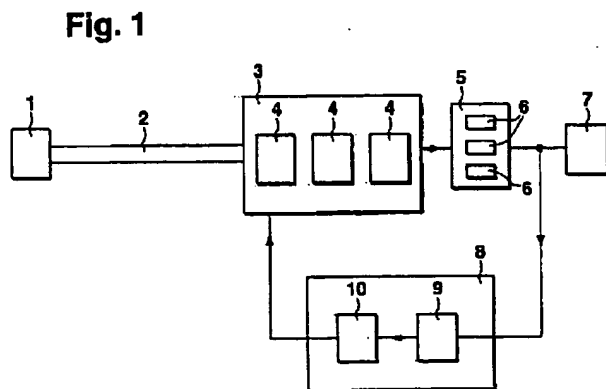
【図1】偏光モード分散を補償するための、本発明による装置を備えた光通信システムの概略図である。

【図2】ポアンカレ球における偏光状態を示す図である。

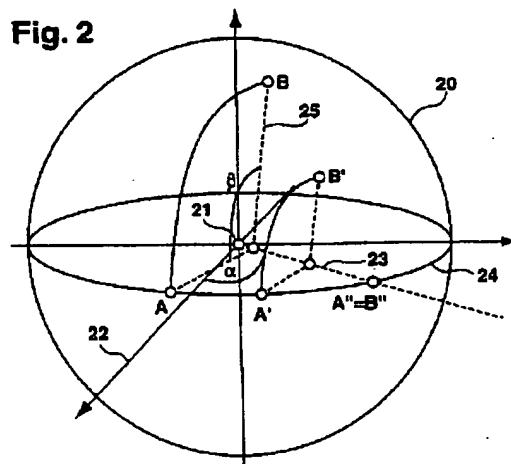
#### 【符号の説明】

- DGD 差分群遅延
- DOP 偏光度
- PMD 偏光モード分散
- PMF 偏光保存ファイバ
- SOP 偏光状態
- 1 放出器端末
- 2 ファイバリンク
- 3 偏光コントローラ
- 4 複屈折エレメント
- 5 差分群遅延（DGD）発生器
- 6 偏光保存ファイバ（PMF）
- 7 受信器端末
- 8 フィードバックループ
- 9 ストークスパラメータ測定手段
- 10 計算ユニット
- 20 ポアンカレ球
- 21 原点
- 22 x軸
- 23 回転軸
- 24 ポアンカレ球の赤道面
- 25 出力部のSOP（B、B' およびB''）と回転軸23を結ぶ線

【図1】



【図2】



## 【外国語明細書】

## 1. Title of Invention

## COMPENSATION OF POLARIZATION MODE DISPERSION

## 2. Claims

1. Method for compensating the polarization mode dispersion (PMD) of a transmitted optical signal by means of a polarization controller (3) coupled to a differential group delay (DGD) generator (5), whereby the polarization controller (3) is controlled by a feedback loop, said feedback loop implementing an optimisation algorithm to optimize a feedback parameter of the output signal of the DGD generator (5), **characterised in that** the algorithm takes into account the state of polarization (SOP) of an optical signal determined from the output signal of the polarization controller (3) or from the output signal from the DGD generator (5).
2. Method according to claim 1, **characterised in that** the feedback parameter is the degree of polarization (DOP).
3. Method according to claim 1, **characterized in that** the SOP is computed from the Stokes parameters measured from the output signal of the DGD generator (5).
4. Method according to any of the preceding claims, **characterized in that** the polarization controller (3) comprises at least one birefringent element (4) and for each birefringent element (4) an angle  $\alpha$  is fixed and a rotation angle  $\beta$  is variable, where the angle  $\alpha$  is the angle between a rotation axis (23) on the equatorial plane (24) of the Poincaré sphere (20) and the x-axis (22) of a coordinate system and the rotation angle  $\beta$  defines the rotation around the rotation axis (23).
5. Method according to the preceding claim, **characterized in that** the impact of each birefringent element (4) on the position of the SOP on the Poincaré sphere (20) is determined.

6. Device for compensating the polarization mode dispersion (PMD) of a transmitted optical signal comprising a polarization controller (3) coupled to a differential group delay (DGD) generator (5) whereby the polarization controller (3) is controlled by a feedback loop, said feedback loop implementing an optimisation algorithm to optimize a feedback parameter of the output signal of the DGD generator (5),, **characterized in that** the feedback loop (8) comprises means (9) for measuring the state of polarization (SOP) determined from the output signal of the polarization controller (3) } or from the output signal from the DGD generator (5) and a computing unit (10) implementing an optimization algorithm, the steps thereof depending on the SOP.
7. Device according to claim 6, **characterized in that** the SOP is computed from the Stokes parameters measured from the output signal of the DGD generator (5).
8. Device according to claim 6, **characterized in that** the polarization controller (3) comprises at least one birefringent element (4) .
9. Device according to claim 6, **characterized in that** the DGD generator (5) comprises at least one polarization maintaining fibre (6) (PMF).

### 3. Detailed Description of Invention

The invention relates to a method and a device for compensating the polarization mode dispersion (PMD) of a transmitted optical signal by means of a polarization controller coupled to a differential group delay generator, whereby the polarization controller is controlled by a feedback signal computed by a control algorithm.

#### State of the art

A method and a device of this type are known in the art through EP-0 853 395.

All types of fiber links present the phenomenon of polarization mode dispersion, i.e. the impulse or signal emitted by an emitter terminal and transmitted via a fiber link is received in a deformed state by a receiver terminal. It shows a longer duration than its original duration. This deformation is due to the fact that the optical signal depolarizes during transmission. The signal received at the other end of the fiber link can be considered as two perpendicular components, where one corresponds to a state of polarization (SOP) with maximum propagation velocity and the other corresponds to an SOP with minimum propagation velocity. In other words, the signal received at the other end of the fiber link can be considered as being constituted by a first signal polarized with a privileged SOP arriving first and a second signal propagating with a second delayed SOP arriving with a delay called differential group delay, which depends in particular on the length of the fiber link.

If the emitter terminal emits an optical signal with a very short impulse, the optical signal received by the receiver terminal consists of two successive impulses polarized perpendicular to one another and having a time delay corresponding to the differential group delay. This delay can be in the order of 20 picoseconds for a link of 100 kilometers comprising a single mode fiber produced a few years ago. The deformation of the impulses received by the receiver terminal can cause errors in decoding the transmitted data, hence the

polarization mode dispersion is a limiting factor for the performance of optical links, analog as well as digital.

Fibers with strong polarization mode dispersion, also called polarization maintaining fibers, are known, which allow supplying a fixed differential group delay by using short sections of fiber. Optical compensation of the polarization mode dispersion can be realized by disposing such a component, or a whole differential group delay generator, between two perpendicular polarization modes which result from a fiber link with strong polarization mode dispersion. This can be implemented either by using a polarization maintaining fibre (PMF) with the same differential group delay as the fiber link, but by exchanging the slow and fast principle SOPs, or by forcing a principle SOP of the system consisting of the fiber link and the PMF to coincide with the SOP of the source of emission. In order to do this, a polarization controller is placed between the fiber link and the PMF.

The value of the differential group delay and the principle SOPs of a link vary over time with temperature and vibrations. A compensation means must therefore be adaptive and the differential group delay of the PMF must be chosen such that it is at least equal to all the values of differential delay that are to be compensated.

Such a means for compensating the PMD in a system of optical transmission became known by the EP 0853 395 A1. The means comprises a polarization controller and a differential group delay generator. The controller and the generator are disposed between the fiber link and the receiver terminal. A feedback loop measures the degree of polarization (DOP) of the optical signal delivered by the DGD generator and feeds the polarization controller such that the DOP measured is optimized. However, using the DOP as feedback variable requires a complicated algorithm for computing the control of the polarization

controller. Furthermore, the rewinding of birefringent elements in the polarization controller constitutes a major problem.

#### Object of the invention

The object of the present invention is therefore to provide a method and a device for a faster and more accurate control of the polarization controller.

#### Teaching of the invention

In a first aspect of the invention, the problem is solved by a method and a device for compensating the polarization mode dispersion (PMD) of a transmitted optical signal by means of a polarization controller coupled to a differential group delay (DGD) generator, whereby the polarization controller is controlled by a feedback loop, said feedback loop implementing an optimisation algorithm to optimize a feedback parameter of the output signal of the DGD generator. The algorithm takes into account the state of polarization (SOP) of an optical signal determined from the output signal of the polarization controller or from the output signal of the DGD generator. The feedback parameter can be the DOP, or a measure of the electrical spectral width, or a measure of the eye opening, etc. Preferably it is the DOP, as the measurement procedure is common. If the feedback parameter used is the DOP, it is more practical to measure it at the output of the DGD generator (since the same equipment is used), but the theory holds when it is measured at the input of it.

In a variant of the inventive method the SOP is computed from the Stokes parameters measured from the output signal of the DGD generator. For the feedback loop a very high speed is required. The Stokes parameters can be easily measured and from the measured values the position of the SOP on the Poincaré sphere can be easily computed. Hence the measurement of the Stokes parameters is particularly suitable for a fast and accurate feedback to the

polarization controller. The control signals computed by the algorithm are fed back to the polarization controller. Measurement of the Stokes parameters allows to make the algorithm easier and faster. Thus the processing of high bit rates becomes possible in single mode fiber links.

In a preferred variant of the method the polarization controller comprises at least one birefringent element and for each birefringent element an angle  $\alpha$  is fixed and a rotation angle  $\beta$  is variable, where the angle  $\alpha$  is the angle between a rotation axis on the equatorial plane of the Poincaré sphere and the x-axis of a coordinate system and the rotation angle  $\beta$  defines the rotation around the rotation axis. A birefringent element changes the SOP at its input into another SOP at its output by a rotation of the SOP on the Poincaré sphere.

A polarization controller consists of a cascade of birefringent elements with either a variable  $\alpha$  or a variable  $\beta$ , or both. If a birefringent element is to allow a variable  $\beta$ , the birefringent element must be wound back once the maximum  $\beta$  is reached since it cannot reach infinite values and other birefringent elements would have to compensate for this element. The rewinding process requires a complicated algorithm. In contrast, if the angle  $\alpha$  is variable and  $\beta$  is fixed, the complicated rewinding process of the birefringent elements can be facilitated or even avoided.

Advantageously, the impact of each birefringent element on the position of the SOP on the Poincaré sphere is determined. If the position or the variation of the SOP on the Poincaré sphere is known, the algorithm in the feedback loop can take this into account and vary its step accordingly. The algorithm takes a larger step if the SOP is close to the rotation axis and a smaller step, when the SOP is further away from the rotation axis. In addition, knowing the variation of the SOP due to each birefringent element in the polarization controller allows to combine the birefringent elements such that the voltages applied to them and thus their

position can be changed without changing the SOP. This increases the speed of the rewinding process. Determining the SOP and using it in the algorithm in the feedback loop could also be used with polarization controllers of the state of the art, i.e. where  $\beta$  is fixed and  $\alpha$  is variable.

In a preferred embodiment of the inventive device, the polarization controller comprises at least one birefringent element. The control signals determined by the algorithm in the feedback loop are fed back to the polarization controller and the positions of the birefringent elements in the polarization controller are adjusted in order to compensate for PMD by maximizing the DOP. The constraints on the birefringent elements can be relaxed by use of the inventive device since the algorithm required to compensate for imperfections of the birefringent elements becomes less complicated.

Preferably, the DGD generator comprises at least one polarization maintaining fibre (PMF). The polarization maintaining fiber compensates for the differential group delay resulting from the fiber link by launching the fast signal part into the slow eigenstate of a polarization maintaining high birefringent fiber and vice versa.

Additional advantages of the invention can be gathered from the description and the drawing. Also, the previously mentioned and the following characteristics can be used according to the invention each individually or collectively in any combination. The embodiments shown and described are not to be taken as a conclusive enumeration, but have exemplary character for the description of the invention.

### Description of an embodiment

In Fig. 1 the numeral 1 denotes an emitter terminal transmitting data as an optical signal, for example by modulating the intensity of one or several completely polarized optical carrier waves supplied by a laser. This optical signal is fed into a fiber link 2 connected to a polarization controller 3. The polarization controller 3 comprises several cascaded birefringent elements 4 for controlling the state of polarization (SOP). The polarization controller 3 is used for turning the angle of polarization of all the components of the optical signal received by the polarization controller 3. A differential group delay (DGD) generator 5 is disposed downstream from the polarization controller 3. The DGD generator 5 comprises polarization maintaining fibers 6 (PMF) of different lengths for compensating the differential delay resulting from the fiber link 2.

The optical output signal from the DGD generator 5 is transmitted to a receiver terminal 7 and a feedback loop 8. The feedback loop has a means 9 for measuring the Stokes parameters of the output signal of the DGD generator and a computing unit 10 calculating the control signal for the polarization controller 3 taking into account the Stokes parameters measured by the means 9.

Fig. 2 shows a representation of the state of polarization (SOP), for example A, in the Poincaré sphere 20. The Poincaré sphere 20 represents all the transitional states unpolarized light can assume with equal probability. In Fig. 2 a unit sphere (radius = 1) is drawn with a system of coordinates, the origin 21 of which lies in

the center of the Poincaré sphere 20. A birefringent element 4 changes the SOP  $A, A', A''$  at its input into another SOP at its output  $B, B', B''$  by a rotation of the SOP on the Poincaré sphere 20. The position on the Poincaré sphere 20 of an SOP  $B, B', B''$  of polarized light is defined by an angle  $\alpha$  between the x-axis 22 of the system of coordinates and a rotation axis 23, and an angle  $\beta$  between the equatorial plane 24 of the Poincaré sphere 20 and a line 25 connecting the SOP  $B, B', B''$  at the input and the rotation axis 23, with the line 25 being perpendicular to the rotation axis 23.

In Fig. 2 the angle  $\alpha$  is fixed and the angle  $\beta$  is variable. The SOPs  $A, A', A''$  at the input lie in this case all on the equator line of the Poincaré sphere. Each has a different distance to the rotation axis 23. When the birefringent element rotates the SOPs  $A, A', A''$  at the input by the angle  $\beta$  around the rotation axis 23, the SOPs  $B, B', B''$  result. If the distance of an SOP  $A, A', A''$  at the input to the rotation axis is large, the distance of the SOP  $B, B', B''$  at the output is also large. Thus, the algorithm in the feedback loop can adapt its step according to the distance of an input SOP  $A, A', A''$  from the rotation axis 23, i.e. a wider step when  $A, A', A''$  is close to the rotation axis and vice versa.

For a practical implementation of the algorithm and the measurement of the Stokes parameter the embodiment uses polarizers and photodiodes. An example of realization can be found in "Polarization measurement of signal and components", Agilent Technologies, Application Note 8509-1.

The rotation axis is determined locally by a small dithering of  $\beta$ . From the measured SOP, the rotation matrix can be obtained. The computation of the rotation axis will take into account the theory developed in "Polarization control for coherent communications", N. Walker et al., IEEE Journal of Lightwave Technology, vol.8, n3.

The algorithm operates as follows: Let us assume that the polarization controller in the PMD compensator is composed of four birefringent elements called cells. In a standard algorithm, the driving voltages of the cells are dithered one after the other. For each cell, the sequence is as follows:

- ◆ the voltage is increased by a fixed amount  $\Delta V$
- ◆ the feedback signal (DOP or other) is measured
- ◆ if the feedback signal increases, the voltage is increased again by  $\Delta V$  if not it is set back to the initial value
- ◆ the same procedure is repeated with a decreased voltage

Taking into account the invention, the algorithm can now dither the voltage with a variable step  $\Delta V$  leading to a constant angular step on the Poincaré sphere. For each cell, the rotation axis is determined locally. The voltage to be applied on the cell therefore depends on the distance between the SOP and the rotation axis of the cell, and the target angular step. The main advantage is that the impact of each cell is quantitatively known: if the SOP is on the rotation axis of a cell, it is a waste of time to actuate this cell as it will have no effect on the polarization control.

In the case of a "rewinding", when the impact of each cell is formally known, it is possible to find the best combination of rotations that will bring us back to the initial SOP with reasonable voltages on the cells.

#### 4. Brief Description of Drawings

**Fig. 1** a schematic representation of an optical communications system comprising an inventive device for the compensation of polarization mode dispersion.

**Fig. 2** a representation of the state of polarization in the Poincaré sphere.

Fig.1

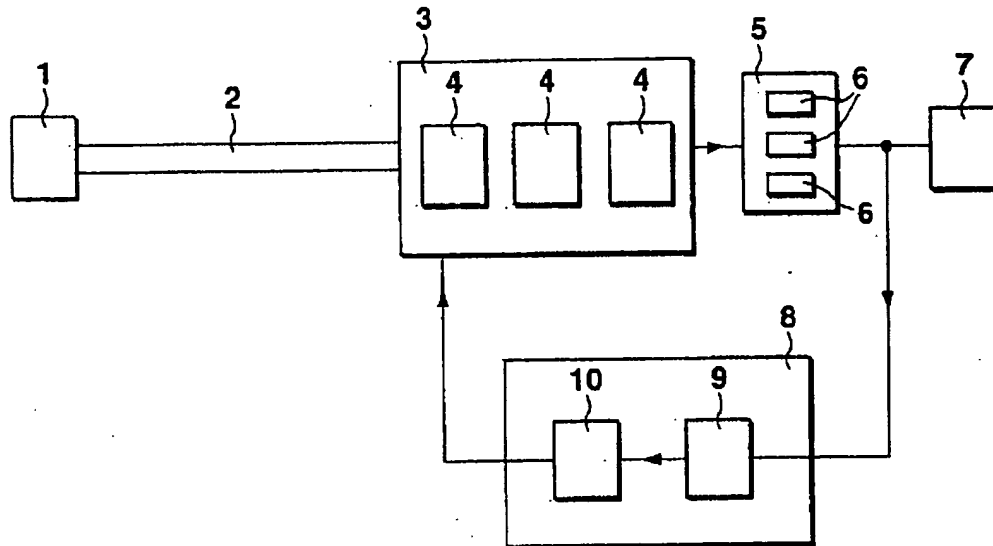
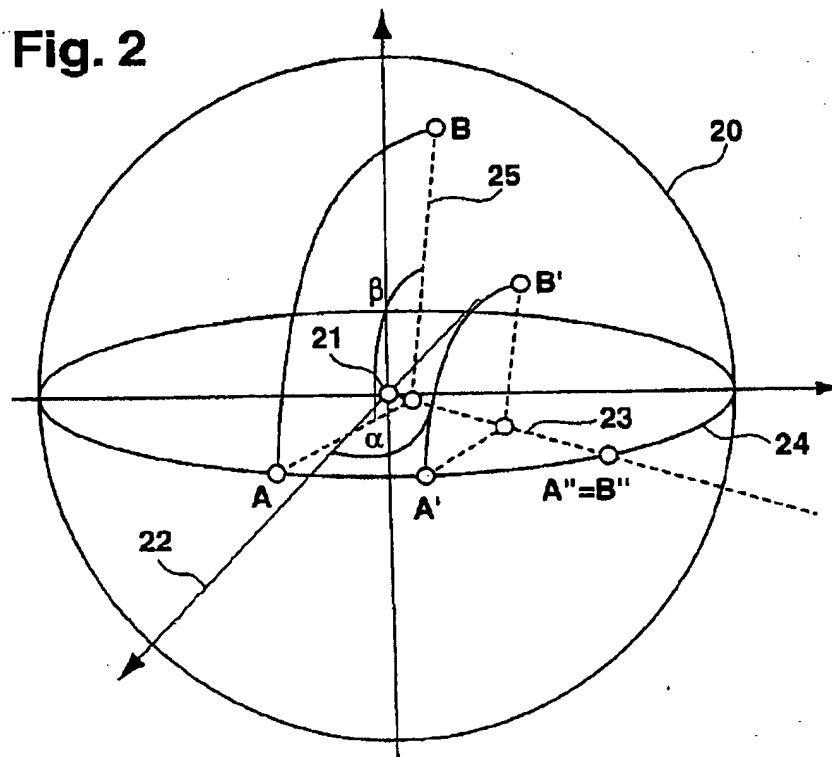
**Fig. 1**

Fig.2

**Fig. 2**

## 1. Abstract

A method and a device for compensating the polarization mode dispersion (PMD) of a transmitted optical signal comprise means of a polarization controller (3) coupled to a differential group delay (DGD) generator (5). The polarization controller (3) is controlled by a feedback loop, said feedback loop implementing an optimisation algorithm to optimize a feedback parameter of the output signal of the DGD generator (5). The algorithm takes into account the state of polarization (SOP) of an optical signal determined from the output signal of the polarization controller (3) or from the output signal from the DGD generator (5).

## 2. Representative Drawing

Fig. 1